综合评述·

发动机无凸轮轴气门驱动的研究与进展

李红艳, 赵雨东

(清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 北京　100084)

摘要: 阐述了在发动机上以电磁、电液、电气或其他方式驱动气门,实现无凸轮轴气门驱动,可以灵活改变气门正时,简化发动机结构,能有选择地闭缸,灵活改变发动机有效压缩比以适应多种燃料要求,使发动机获得比采用一般可变气门驱动更多的好处。无凸轮轴气门驱动的主要问题是响应速度不够高、气门落座冲击、能耗过高以及驱动系统复杂昂贵。目前无凸轮轴气门驱动还未达到大规模实用化的程度。

关键词: 发动机; 可变气门驱动; 气门机构

中图分类号: TK413.4　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1001 - 2222(2001)02 - 0001 - 05

汽车发动机采用可变气门驱动,使气门正时、气门开启延续时间、气门升程随发动机的工况变化,可以改善怠速稳定性,增加低速下外特性扭矩,改善部分负荷燃油经济性和降低有害排放。长期以来,人们提出了包括无凸轮轴气门驱动在内的数以千计的可变气门驱动机构方案,并对采用可变气门驱动的好处进行了广泛研究。目前,已有几种基于传统气门驱动方式的可变气门驱动机构用于批量生产的汽车发动机上,同时取代传统气门驱动的无凸轮轴气门驱动机构也已从纯实验室研究进入了在汽车发动机上装机试用的发展阶段。

无凸轮轴气门驱动(camshaftless valve actuation)就是取消发动机传统气门机构中的凸轮轴及其从动件,而以电磁、电液、电气或其他方式驱动气门。采用无凸轮轴气门驱动,除了和其他可变气门驱动一样,能使发动机在燃油经济性、动力性和降低排放等方面得到好处外,还有一些特别的好处。当然,无凸轮轴气门驱动的每种方案也都有各自的问题。本文对近年来进行的无凸轮轴气门驱动研究进行了归纳和分析。

1　采用无凸轮轴气门驱动的特别好处

1) 能灵活地、单独地控制进排气门开启及关闭 4 个定时中的任一定时及气门开启延续时间,使发动机每一工况的这些参数都符合最佳性能要求;而有凸轮轴的可变气门正时机构实现的气门正时和气门开启延续时间一般只能按驱动机构的运动学关系同时变化而不能独立变化。因此,采用无凸轮轴气门驱动在改善发动机性能方面可获得更好的效果。

2) 简化了发动机的结构,降低了发动机的加工成本和质量;气门可根据燃烧室的型式来布置,不必布置在与凸轮轴中心线垂直的平面上,气门布置的灵活性可能导致设计出新的更有利于发动机工作的燃烧室型式。

3) 每个气门单独驱动(旋转气门除外),因此容易实现依次停缸,使发动机处于较低燃油消耗率的工作状态,降低使用油耗。

4) 可通过实时改变进气晚关角来改变多种燃料发动机的有效压缩比,以适应不同燃料的要求[1]。

2　电磁气门驱动

2.1　基本情况和工作原理

电磁气门驱动(electromagnetic valve actuation)是利用电磁铁产生的电磁力驱动气门。早期试验的电磁气门驱动装置中没有起能量回收作用的弹簧或只有回收部分能量的单弹簧,导致能耗过大并有严重的气门落座冲击。现在已很少有人研究这一类方案了。Aura Systems 公司、FEV 公司和通用汽车公司分别提出了工作原理基本相同的采用双弹簧双电磁铁气门驱动方案(见图 1),并进行了多年的研究[1~5]。目前,Aura Systems 和 FEV 的电磁气门驱动机构已经装车试用。

电磁气门驱动机构主要由两个相同的电磁铁(共用一个衔铁)、两个相同的弹簧和气门组成。发

收稿日期: 2000 - 11 - 01; **修回日期**: 2000 - 12 - 15

作者简介: 李红艳(1974 -),男,湖北省武汉市人,1998 年毕业于西安交通大学,现在清华大学汽车工程系读研究生,研究方向为发动机可变气门驱动技术.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

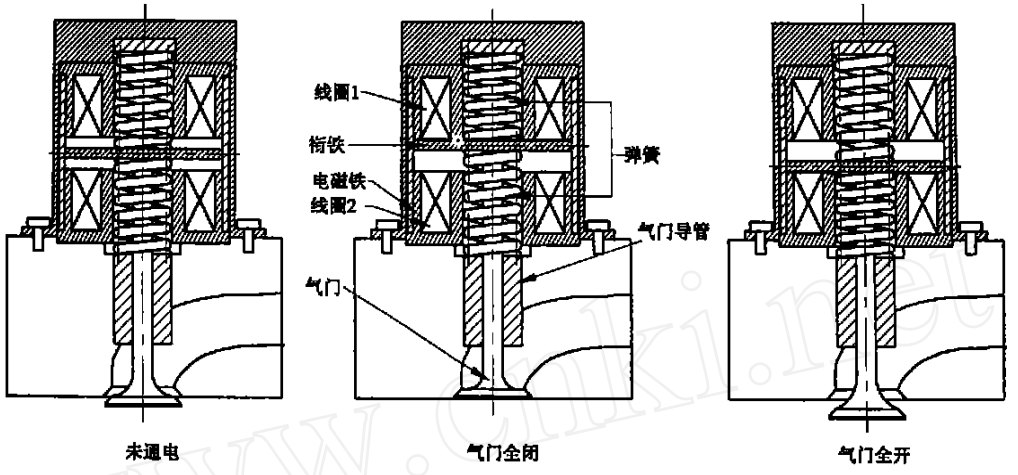

图 1 电磁气门驱动原理

动机不工作时,激磁线圈 1 和线圈 2 均不通电,气门半开半闭;发动机启动时,气门驱动装置初始化,控制系统根据曲轴转角判定气门在这一时刻应有的开、关状态,使线圈 1 或线圈 2 通电,电磁力克服弹簧力,将气门关闭或开启。气门处于开启状态时,线圈 1 不通电,线圈 2 则必须通电,使电磁力等于或大于弹簧力以保持气门开启。要关闭气门时,线圈 2 断电,衔铁和气门在弹簧力的作用下向上运动;在气门接近关闭位置时,线圈 1 通电,电磁力帮助气门(衔铁)快速运动至关闭位置;此后线圈 1 继续通电,使气门保持在关闭状态。需要开启时,线圈 1 断电,衔铁和气门在弹簧力作用下向下运动。如此循环往复。

Aura 公司的电磁气门驱动装置在转速为 10 000 r/min 的汽油机上演示时,气门由关闭位置至最大升程位置(或反方向)的过渡时间为 3 ms,气门落座速度为0.1m/s;初始化时线圈电流为15A～25 A,气门保持在关闭或最大升程位置时线圈电流为 1.5 A～4.0 A;汽油机怠速时每个气门上的能量消耗为 35 W,6 000 r/min 时为 135 W;柴油机转速在 2 000 r/min 时为 185 W。Aura 公司称,采用其电磁气门驱动机构使发动机油耗降低 7 %～10 %,功率增加 14 %～16 %,扭矩增加 16 %,HC,CO 和 NO_x 排放分别降低 34 %～37 %,33 %和 50 %[1,2],但没有关于发动机参数及比较基础的详细说明。1996 年 SAE 年会车展展出了装有采用 Aura 公司电磁气门驱动装置的汽油机的轻型卡车。

据 FEV 公司介绍,汽油机采用电磁气门驱动可降低 FTP 循环油耗 15 %,HC 和 NO_x 排放可分别减少 5 %～10 %和 40 %～60 %[3],但也没有详细说明。2000 年 SAE 年会展展出了采用 FEV 电磁气门驱动机构的一台每缸 4 气门汽油机。通用汽车公司用电磁气门驱动机构进行了以进气门晚关控制发动机负荷的研究[4],他们在电磁气门驱动机构中还采用了永磁铁,目的是为气门在关闭或最大开启位置时提供克服弹簧力的保持力,以减小电能消耗。

2.2 主要问题

从理论上说,电磁气门驱动控制方便,结构较为简单,是最容易想到的无凸轮轴气门驱动方式。它的主要问题是气门落座冲击,电磁响应速度不够高,能量消耗及尺寸过大。

气门落座冲击是由电磁驱动的特点所决定的。如前所述,气门接近关闭位置时(见图 1),线圈 1 通电,电磁力使气门快速落座,在这一过程中,衔铁与铁芯气隙越来越小,而电磁力却越来越大,必然产生气门落座冲击,导致气门疲劳损坏和强烈噪声。因此,必须在电磁气门驱动机构的结构设计和控制策略上采取措施,限制气门落座速度。Aura 和 FEV 等公司都未说明他们是如何降低气门落座速度的,文献[5]认为可通过实时控制线圈电流大小实现气门落座软着陆。

气门驱动要求电磁铁做到高速、强力、大行程并且体积足够小,而要同时完全满足这 4 方面的要求是很困难的。在电磁驱动装置满足气门升程的情况下,又要求它具有足够高的响应速度(在最高转速时发动机能正常工作),就必须增大弹簧刚度和预紧力,以提高质量—弹簧振动系统的振动频率;这又要求电磁驱动装置在初始化时有足够大的电磁力使气门就位(关闭或开启最大),在气门关闭和最大开启

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

位置有能克服弹簧力的较大的电磁力使气门保持在这两个位置。这样就得加大电磁气门驱动机构的尺寸和电能消耗,使电磁气门驱动机构在气缸盖上难于布置,并有可能使消耗的能量抵消了发动机所能获得的好处。电磁气门驱动在响应速度、尺寸和能耗方面的矛盾只能通过选择合适的磁性材料和合理设计电磁铁的结构来得到折衷解决。

3　电液气门驱动

3.1　基本情况和工作原理

电液气门驱动(electrohydraulic valve actuation)的工作原理是,将气门与一个液压活塞相连接,通过电磁阀控制液压缸内高压和低压液体的流入和流出,从而控制液压活塞—气门的运动。近 20 a 来,有多家机构对电液气门驱动进行过或正在进行研究[6~12]。

Richman 等人在电机拖动的单缸机上对其电液气门驱动装置的试验表明,气门实际运动总是比程序规定的运动滞后。在发动机转速小于 1 000 r/min 时,滞后量尚可接受,但随转速增加,滞后量增大,并且升程曲线也产生越来越严重的变形[6]。Griffiths 等人的电液气门驱动系统可在发动机转速为 3 000 r/min 时保持稳定性和良好的气门运动精度[7]。Lotus 公司的电液气门驱动系统能在发动机转速为 4 000 r/min 的情况下正常工作,在单缸机上进行过取消节气门以电液气门驱动控制负荷的研究[8]。Daimler—Benz 公司的电液气门驱动系统与前述双弹簧双电磁铁的电磁气门驱动工作原理类似,该系统在液压活塞的两端各安置了一个弹簧,液压活塞及气门在气门关闭和气门全开这两个位置之间振动[9]。

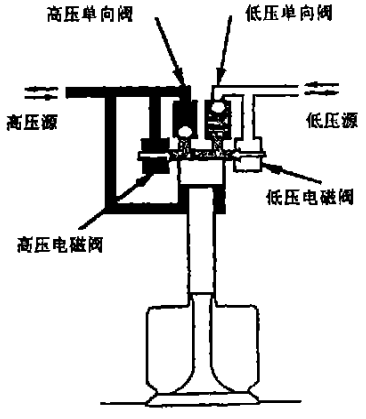

图 2　Fort 公司电液气门机构驱动原理

Fort 公司的电液气门驱动工作原理如图 2 所示[10]。液压活塞与气门相连,活塞上端面的液压腔可连通高、低压源,下端面的液压腔则只能连通高压源。通过两个电磁阀的适时开、闭可实现气门的开启和关闭。驱动单个气门的实验表明,该电液气门驱动系统可达到相当于发动机转速在 8 000 r/min 下的响应速度;在上液压腔增加一个缓冲室后,气门落座速度可降到 0.1 m/s 以下[11]。但未见装在发动机上进行试验的报道。

3.2　主要问题

电液气门驱动现仍然处于实验室研究阶段。它的一个重要优点是除了气门正时外,气门升程也可根据发动机工况需要而改变,这对取消节气门用进气门控制负荷尤其有利。电液气门驱动机构的主要问题是响应速度不够高、气门落座冲击、能耗过大和系统复杂等。

气门对控制信号的响应速度主要与液压流体的高压压力、可压缩性、粘度、运动惯性(密度)以及控制电磁阀的泄漏情况有关。液压流体高压压力越低、可压缩性和粘度越大(尤其是在低温情况下)、运动惯性越大、控制电磁阀的泄漏越多,则气门响应速度越慢。液压系统采用的流体一般为液压油或发动机的机油,其基本参数一定,因此只能采取提高工作压力、采用闭环控制、减小电磁阀的泄漏等方法来提高电液气门驱动系统的响应速度。但加大液体压力又会带来能耗过大和密封困难等问题。

电液气门驱动系统工作时,高压液体的压力波动、可压缩性、控制电磁阀的低响应速度以及发动机气缸内的气体压力波动都使得气门运动难以精确控制。因此,很难得到象传统凸轮控制气门那样小的落座速度。解决气门落座冲击的较好办法是从液力系统结构上设置气门落座阻尼。

除 Daimler—Benz 公司外,其他几家机构研究的电液气门驱动都没有专门的能量回收装置,因此系统效率很低,功率消耗很大。

电液气门驱动系统需要能快速开关的电磁阀、高压(文献[6]和文献[7]介绍的电液系统流体压力分别为 20.4 MPa 和 28 MPa)流体供给装置和密封装置,极大地增加了气门驱动机构的复杂性和成本。即使没有可靠性和耐久性的问题,这种系统实用化也是困难的。

4　电气气门驱动

电气气门驱动的工作原理与电液气门驱动相

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

似,只不过将液体换成了气体。迄今为止,公开报道电气气门驱动研究工作的只有一篇论文[12]及相应的一篇专利文献。但也有报道说 BMW 公司的一级方程式赛车上每缸 4 气门的 3.0 L 发动机是用电气驱动方式驱动气门的[13]。

Gould 等人的电气气门驱动装置见图 3[13],它的上、下两部分完全相同,都有高压室、低压室、气阀、活塞阀、永磁铁和锁紧线圈;装置的中间是一个气缸,内有活塞(联接气门),气缸中间有一圈与低压室相通的气口。图 3 所示为气门关闭时的情况。气门开启和关闭是通过电磁阀控制活塞上、下空腔内气体流动实现的。

试验结果表明,该电气气门驱动装置能在 1.25 ms～3 ms 内将气门打开,时间长短取决于气压的大小;气压为 0.6 MPa,气门升程为 10 mm 时,打开时间为 2 ms。该装置响应速度能满足发动机 7 200 r/min 时的工作要求,但其功率消耗较大。在发动机转速为 1 500 r/min 时驱动 8 个气门所消耗的功率是 2.5 kW。Gould 等人用此装置在一台直列 4 缸汽油机上进行了控制负荷的试验,在 1 500 r/min 时有效燃油消耗率至少降低 4.4 %,动力性能不变,NO_x 排放减少 60 %,但 HC 和 CO 排放增加,燃烧稳定性变差。

与电液气门驱动中采用的介质(液体)相比,空气的粘度低,且粘度受温度的影响小,运动惯性小,这些都有利于提高电气气门驱动的响应速度;但空气更具有可压缩性,会削弱采用它作为介质带来的好处。同电液气门驱动一样,电气气门驱动也有气门落座冲击、能耗大、响应速度不够及结构复杂等问题。

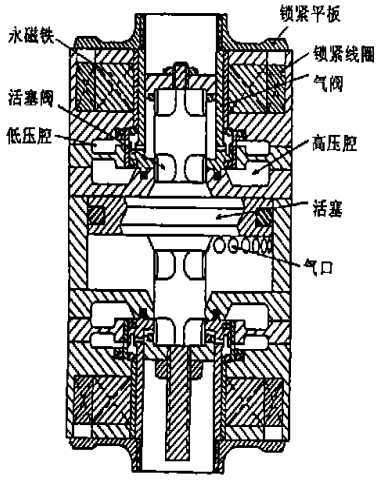

图 3 Gould 等人电气气门驱动装置剖面图示意

5 其他气门驱动方式

近年来研究的其他方式的无凸轮轴气门驱动机构包括电机—凸轮驱动和旋转驱动器—摇臂驱动等。

P. Fitsos 等人提出了用旋转驱动器—摇臂驱动气门的方法,如图 4 所示[14]。旋转驱动器工作原理类似于计算机中驱动读写磁头的驱动装置,能够快速运动,准确定位。但文献[17]只对此驱动方式进行了仿真计算。

R. P. Henry 等人提出了电机—凸轮驱动气门的方案(见图 5)[15]。电机轴、凸轮、凸轮从动件总成及气门在同一轴线上。电机及凸轮转动时,凸轮从动件及气门作往复运动;控制电机的瞬时转速和旋转方向,即可改变气门正时和升程。样机试验表明,在相当于发动机转速 2 500 r/min 以上时能量消耗很大,并且气门落座速度随转速增加而增大,在 2 500 r/min 时达 0.30 m/s。

这些驱动气门的方式都有气门落座冲击、响应

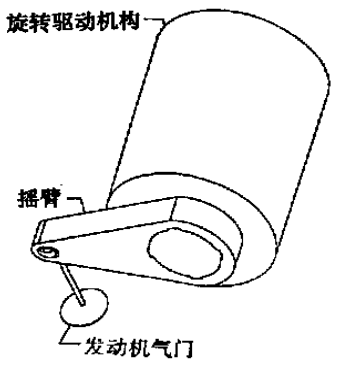

图 4 旋转驱动器—摇臂气门驱动示意

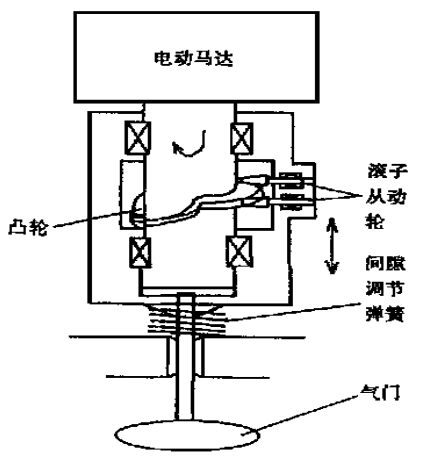

图 5 电机—凸轮气门驱动机构示意

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

速度、能量消耗和机构复杂等问题。对旋转电气气门驱动和旋转驱动器—摇臂气门驱动的研究远不如对电磁、电液气门驱动的研究那样深入。还有人进行了以旋转气门代替往复运动的菌形气门的尝试[16],但可靠密封和润滑的老问题依然没有解决。

6　结束语

1) 无凸轮轴气门驱动包括电磁、电液、电气和旋转驱动器等多种方式。采用无凸轮轴气门驱动可灵活改变气门正时,简化发动机结构,有选择地停缸,灵活改变发动机有效压缩比以适应多种燃料要求,使发动机获得比采用一般可变气门驱动更多的好处。

2) 采用无凸轮轴气门驱动需要解决的主要问题是:响应速度不能满足发动机高速工况工作的要求、气门落座冲击、能耗过高和系统复杂昂贵;此外还有可靠性和耐久性问题。

3) 目前,电磁气门驱动已装车试用,但仍在改进之中;电液、电气、电机—凸轮、旋转驱动器—摇臂及旋转气门等还处于实验室研究阶段。

参考文献:

[1] Goldste R J. Variables of Electromagnetic Valve Actuator Performance[J]. Engine Technology International,1997(11):84 - 88.

[2] Gottschalk M. Electromagnetic Valve Actuator Drives Variable Valvetrain[J]. Design News,1993(1):123 - 125.

[3] Kreuter P, Heuser P, Schebitsz Michael. Strategies to Improve SI-Engine Performance by Means of Variable Intake Lift, Timing and Duration[C]. SAE Paper 920449,1992.

[4] Mark A Theobald, Lequesne B, Henry R. Control of Engine Load via Electromagnetic Valve Actuators[C]. SAE Paper 940816,1994.

[5] Schulz V F, Seitz W E. Gently Does It[J]. Engine Technology International. 1998(annual review):116 - 119.

[6] Richman R M, Reynolds W C. A Computer-Controlled Poppet-Valve Actuation System for Application to Turbocharged Diesel Engine[C]. SAE Paper 880340,1988.

[7] Griffiths P J, Mistry K N. An Electro-hydraulic Valve Operating System for Engine Research and Development, Experimental Methods in Engine Research and Development[C]. IMechE Seminar. 1988:846 - 862.

[8] Klein F, Kuhn M, Weimann H J, *et al*. The Influence of the Valve Stroke Design in Variable Valve Timing Systems on Load Cycle, Mixture Formation and the Combustion Process in Conjunction with Throttle-Free Load Governing[C]. SAE Paper 981030,1998.

[9] 田新民. 无需凸轮轴的电动液压气门定时机构[J]. 国外内燃机. 2000(1):62 - 63.

[10] Schechter M M, Levin Michael B. Camless Engine[C]. SAE Paper 960581,1996.

[11] Dean H K, Anderson Mark D, Tsao Tsu-chin. Dynamic Model of a Springless Electrohydraulic Valvetrain[C]. SAE Paper 970248,1997.

[12] Gould L A, Richeson W E, Erickson F L. Performance Evaluation of a Camless Engine Using Valve Actuators with Programmable Timing[C]. SAE Paper 910450,1991.

[13] Bokulich F. BMW Returns to Formula One with V10[J]. Automotive Engineering International. 2000(3):42.

[14] Fitsos P, Harralson J. Valve Timing by Means of a Rotary Actuator[C]. SAE Paper 1999 - 01 - 0330,1999.

[15] Henry R P, Lequesne B. A Novel, Fully Flexible, Electro-Mechanical Engine Valve Actuation System[C]. SAE Paper 970249,1997.

[16] Cross P C. A Rotary Valve Combustion System with Throttleless Inlet Charge Control[C]. SAE Paper 940813,1994.

A Survey of Camshaftless Valve Actuation for Engines

LI Hong-yan, ZHAO Yu-dong

(Tsinghua University, State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Beijing　100084, China)

Abstract: Camshaftless valve actuation includes electromagnetic, electrohydraulic, electropneumatic and electromechanical types. it could vary valve timing agilely, simplify the engine's structure, deactivate some of the engine's cylinders selectively and vary the effective compression ratio flexibly to adapt different fuels. So it could offer more advantages than general variable valve timing. The main problems of the camshaftless valve actuation are long response time, hard valve landing, high power consumption and complex, high-priced actuation system. At present there are no camshaftless valve actuation in practical application.

Key words: engines; variable valve actuation; valve train

[编辑: 张玉花]

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net